

하이브리드 굴삭기 연비 개선 연구[§]

조성우* · 유승진* · 박철규*

* 두산 인프라코어

Improving Fuel Efficiency of a Hybrid Excavator

Sungwoo Cho^{*}, Seungjin Yoo^{*} and Cheol-Gyu Park^{*}

^{*} Doosan Infracore Co., Ltd

(Received April 11, 2014 ; Revised September 16, 2014 ; Accepted September 16, 2014)

Key Words: Compound-type Hybrid Excavator(복합형 하이브리드 굴삭기), Fuel Efficiency(연비), Variable Engine Speed Control(엔진 가변속도 제어), Pump Control(펌프 제어), Ultra-capacitor Voltage Control(울트라 캐패시터 전압제어)

초록: 환경 문제 및 화석연료 고갈에 대한 관심으로 인하여 배기가스에 대한 규제는 날이 엄격해지고 있으며 높은 연비에 대한 수요는 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 시대적 요구를 뒷받침하기 위하여 저배기-고연비가 특징인 하이브리드 굴삭기가 현실적인 대안으로서 각광받고 있으며 지속적으로 연구되고 있다. 본 연구에서는 선회 구동 전동기, 엔진보조 전동기, 울트라 캐패시터, 전력변환장치를 중형 굴삭기에 탑재한 복합형 하이브리드 굴삭기를 개발하였으며, 일반적인 복합형 하이브리드 굴삭기의 연비 개선요소(선회 구동 에너지 회생, 엔진 작동 속도 변경)외에 추가적으로 적용된 연비개선 방법론들에 대하여 다루고 있다. 본 방법론들을 적용함으로써 연비와 운전 조작성을 동시에 개선할 수 있었다.

Abstract: Emission gas regulations and constantly increasing fuel costs call for the worldwide use of environmentally friendly and energy-efficient machines in industry. To meet these requirements, a hybrid excavator prototype has been developed that incorporates an electric swing motor, engine assist motor, and ultra-capacitor module into a conventional hydraulic excavator of the 22-ton class. This paper mainly describes a few techniques to optimize its energy efficiency. These include 1) controlling the engine speed in proportion to the load torque, 2) controlling the pump displacement when driving the electric swing system, 3) managing the ultra-capacitor voltage to minimize the electrical energy loss, and 4) reducing the cooling fan speed to improve the energy efficiency of the system.

- 기호설명 -

ω_{eng}^H : 엔진 최고 속도
 ω_{eng}^L : 엔진 최저 속도
 ω_{sw}^H : 선회 최고 속도
 ω_{sw}^L : 선회 최저 속도
 P_{gen} : 엔진보조전동기 출력
 I_{pump}^H : 펌프 제어전류 상한치
 I_{pump}^L : 펌프 제어전류 하한치
 τ_{pump} : 펌프 토크

C : 울트라 캐패시터 정전용량
 p_{pump}^{max} : 펌프 최대 출력
 p_{sw}^{max} : 선회전동기 최대 출력
 p_{gen}^{max} : 엔진보조전동기 최대 출력
 V_{UC}^{max} : 울트라 캐패시터 최대전압
 V_{UC}^{min} : 울트라 캐패시터 최저전압

1. 서 론

날이 갈수록 높아져가는 환경문제에 대한 관심으로 인해 엄격한 온실가스에 대한 규제는 시대적 흐름으로 자리잡고 있다. 이러한 움직임은 승용차 업계에서 시작하여 건설기계 업계까지 빠르게 전파되고 있다. 북미 지역에서 1996 년 Tier 1 규제가 발효된 이래로, 2015 년부터 적용될 Tier 4 까지 규제의 수위는 날이

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 IT 융합부문 춘계학술대회(2014. 4. 24.-25., 서울대) 발표논문임

† Corresponding Author, seungjin.yoo@doosan.com

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

갈수록 강화되고 있다. 뿐만 아니라, 화석연료의 고가에 대한 우려와 개발도상국에서의 화석연료에 대한 수요 증가는 국제유가의 상승으로 이어지고 있으며, 이에 따라 소비자들의 건설기계 구매기준 또한 변화하고 있다. 국제 유가의 지속적인 증가가 예상되는 가운데 고효율 건설기계에 대한 수요가 급격히 증가하고 있으며, 건설기계 회사들 역시 연비개선에 총력을 기울이고 있다. 이러한 시대적 요구를 만족시키기 위해, 하이브리드 굴삭기가 현실적인 대안으로서 연구되어 왔다.^(1,2) 본 연구의 선행 연구^(1,2)에서는 기존 연구를 통해 22 톤 굴삭기에 선회 전동기, 엔진보조 전동기, 울트라 캐패시터 모듈을 장착한 복합형 하이브리드 굴삭기를 다루었다. 복합형 하이브리드 굴삭기는 선회 전동기를 통해 기존에는 버려졌던 선회 구동에너지의 일부를 회수할 수 있으며, 엔진 작동 속도를 엔진 효율이 높은 저속 영역으로 이동시킴으로써 고연비, 저배기의 목표를 달성할 수 있었다.⁽¹⁻⁷⁾ 본 연구의 목표는, 기존 연구에서 한 발 더 나아가 하드웨어의 큰 변경 없이 시스템의 효율과 운전 조작성을 추가적으로 개선하는데 있으며, 이를 달성하기 위해 4 가지 방법이 사용되었다.

첫 번째 방법은 엔진 가변속도 제어로서, 유압 펌프의 요구 토크와 울트라 캐패시터의 요구 충전량을 고려하여 엔진의 목표속도를 변경해줌으로써 기존 방식대비 성능 저하 없이 동력 손실을 낮추고 엔진의 작동효율을 높여주는 방법이다.

두 번째는 선회복합동작 펌프 제어이다. 선회 전동기의 토크와 속도와 비례하게 펌프의 출력을 낮춰줌으로써, 선회 복합동작에서의 과도한 펌프 출력 생성을 막아 연비를 향상시키면서 기존 굴삭기와 동일한 작업 특성을 구현하였다

세 번째 방법은 울트라 캐패시터의 충전량 제어 로직 개선이다. 선회 구동에너지가 회생될 전력량을 고려하여 캐패시터의 목표 전압을 제어해줌으로써, 선회 동력의 회생량을 극대화하고 전력손실을 최소화하였다.

마지막으로 냉각 팬 속도를 줄여 냉각 손실을 감소시켰다. 엔진과 유압펌프의 평균 출력이 크게 낮아지면서 냉각 유체의 온도도 크게 낮아졌다. 따라서, 냉각 팬 속도를 줄여 냉각 손실을 감소시킴으로써 추가적인 연비개선을 달성하였다.

2. 하이브리드 굴삭기의 기본 특성

2.1 하이브리드 굴삭기의 구조

기존 연구를 통해 개발된 복합형 하이브리드 굴삭기의 기본 구조는 Fig. 1 과 같다.⁽²⁾

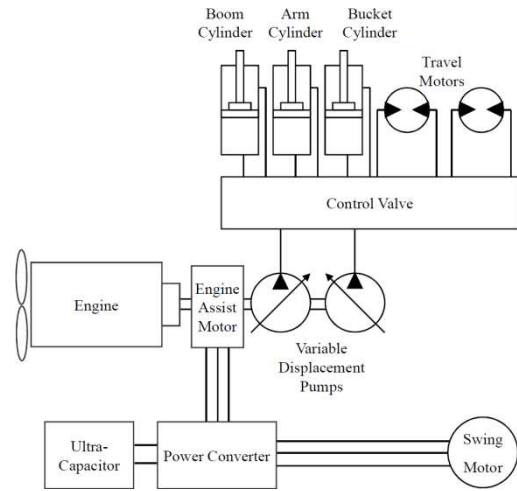


Fig. 1 Power train of the prototype hybrid excavator

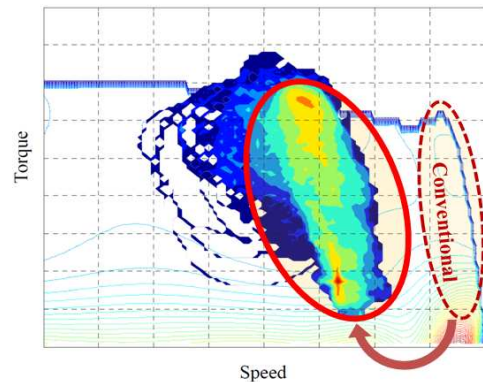


Fig. 2 Operating points of the engine

기존의 유압식 선회모터를 전기모터로 바꿈으로써 선회 구동부를 유압회로에서 분리하였다. 따라서, 선회구동을 제외한 나머지 작업기들은 기존 엔진식 굴삭기와 동일한 방식으로 움직인다. 그리고 엔진과 동축으로 엔진보조 전동기를 장착하였다. 엔진 보조 전동기의 주요 목적은 크게 두 가지로서, 첫 번째는 엔진 단독으로 감당할 수 없는 큰 부하가 펌프로부터 가해졌을 때 엔진 동력을 보조해 주는 것이고, 두 번째는 발전을 통해 선회 전동기가 작동을 할 수 있도록 동력을 공급해주거나 울트라 캐패시터를 충전하는 것이다. 울트라 캐패시터는 전기에너지 저장장치로서 전동기에서 발전된 에너지를 저장한다.

2.2 하이브리드 굴삭기의 연비 특성

복합형 하이브리드 굴삭기의 연비를 향상시키는 두 가지 주요 요소는 엔진 회전속도 이동과 선회 동력 회생이다.

기존 유압식 선회 모터의 경우 선회 운동 에너지는 감속과정에서 소산되나, 복합형 하이브리드

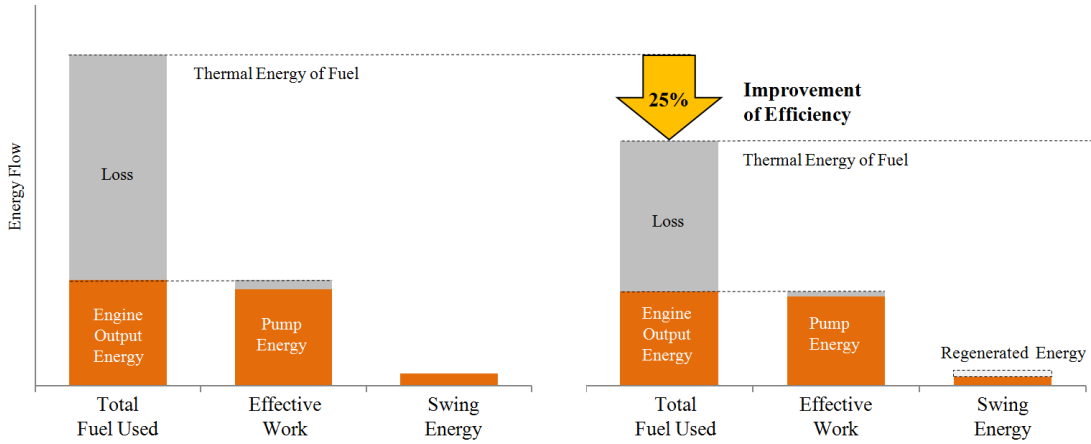


Fig. 3 Comparative analysis of the fuel usage - (L) conventional excavator, (R) hybrid excavator

굴삭기의 경우 선회 전동기가 선회 운동에너지를 전기에너지로 회생하여 저장할 수 있다. 회생된 에너지는 선회 전동기를 다시 가속하는데 쓰이거나, 엔진 보조 전동기가 엔진의 동력을 보조하는데 쓰일 수 있기 때문에, 시스템의 연비를 크게 높일 수 있다.

Fig. 2 는 하이브리드 굴삭기 엔진의 작동점을 보여준다. 하이브리드 굴삭기의 경우, 엔진의 작동 효율을 높이기 위해 엔진속도를 효율이 좋은 영역으로 낮추었다. 그러나, 단순히 엔진 속도만 낮추게 될 경우, 펌프의 유량도 낮아져 작업기의 성능을 악화시키므로, 이를 보상하기 위해 기존의 유압펌프보다 용적이 더 큰 펌프를 장착하였다. 그 결과 낮은 엔진속도에도 불구하고 기존 굴삭기와 동등한 작업 성능을 갖게 되었다.

Fig. 3 은 동등한 작업에서 일반 굴삭기와 하이브리드 굴삭기의 소모된 에너지 양을 비교한 것이다. 그림의 y 축은 각 요소에 전달되는 에너지의 크기를 나타낸 것으로, 총 소모되는 연료의 발열 에너지가 엔진, 유압펌프를 거쳐 선회부에 얼마만큼 전달되는지를 보여준다. 하이브리드 굴삭기의 경우 선회 동력 회생과 엔진 효율 향상으로 인해 전반적으로 높은 효율을 갖게 되었다는 것을 알 수 있다.

3. 하이브리드 굴삭기의 연비 개선

3.1 엔진 가변속도 제어

엔진식 굴삭기의 경우, 엔진에서 대응해야 하는 부하의 절대값이 크고 그 값의 변동 또한 심하기 때문에, 엔진의 회전속도가 항상 높게 유지되지 않으면 작업기가 요구하는 성능을 만족시키기 어렵다. 따라서 일반 굴삭기의 엔진속도는 작업자가

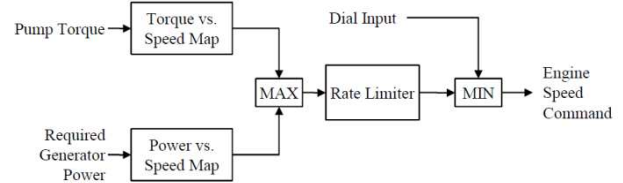


Fig. 4 Block diagram of the engine speed controller

지정하는 설정치에 의해 항상 높게 유지된다. 그러나, 요구출력과 상관없이 엔진속도를 항상 높게 유지하는 것은 저 부하에서 엔진의 효율을 악화시키는 원인이 된다.

복합형 하이브리드 굴삭기의 경우, 출력 상승 속도가 빠른 엔진 보조 전동기가 동력을 보조해주고 있기 때문에, 낮은 엔진속도에서 급격한 부하 변동이 발생하더라도 작업기의 성능저하 없이 부하에 대응하는 것이 가능하다.

따라서 본 복합형 하이브리드 굴삭기는 엔진 가변 속도 제어로직을 적용하였다. 유압 펌프의 부하가 낮은 구간에서는 엔진속도를 낮춰줌으로써 엔진이 고효율 구간에서 작동하도록 하였다. 그러나, 펌프의 부하 상태만으로 엔진속도를 결정하게 될 경우 저부하 상태에서 울트라 캐패시터의 충전이 필요한 상황이 되더라도 충분한 충전이 이뤄지지 못 한다는 문제점이 있다. 따라서 본 로직은 Fig. 4 와 같이, 펌프의 요구부하와 울트라 캐패시터의 요구충전력을 고려하여 각각의 엔진속도를 선정한 후, 그 중에 높은 값을 채택하도록 한다. 각각의 엔진속도를 결정하는 1-D map 은 Fig. 4 와 같다.

3.2 선회복합동작 펌프 제어

엔진식 굴삭기의 유압펌프는 유량 공급을 통해

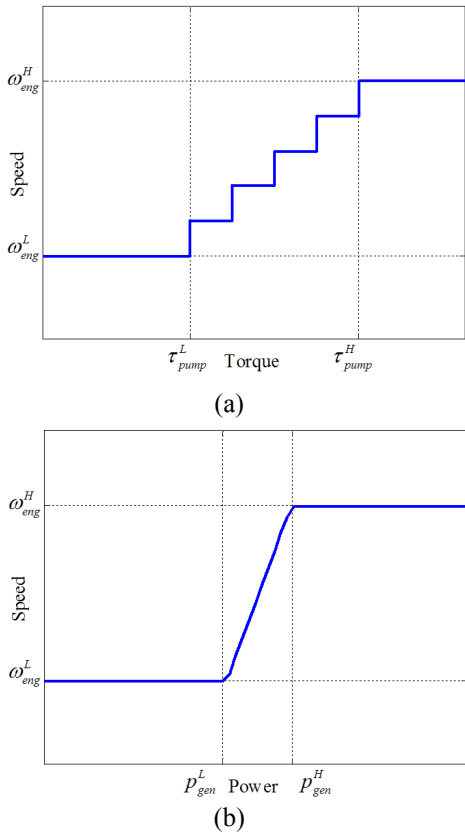


Fig. 5 Control maps for the engine speed controller

붐, 압, 버켓, 선회와 같은 다수의 실린더에 동시에 동력을 공급한다. 따라서, 여러 개의 작업을 동시에 동작할 경우 각 작업기의 최대속도는 단독으로 동작할 때보다 작아지게 된다. 반면 복합형 하이브리드 굴삭기의 경우 선회 모터를 기존 유압 회로에서 분리하여 전기모터로 대체했기 때문에, 선회전동기는 나머지 유압 작업기들과 독립적으로 제어될 수 있다. 이러한 특성을 통해 선회가 포함된 여러 작업기가 동시에 동작될 경우, 하이브리드 동력계에서 내줄 수 있는 총 출력이 일반 굴삭기의 동력계에서 내줄 수 있는 출력보다 높다는 장점이 있다. 그러나, 운전자들은 높아진 선회 복합동작 성능에 오히려 불편함을 느끼는데, 그 이유는 굴삭기 운전자들이 선회 출력이 작아지는 일반적인 굴삭기 특성에 익숙하기 때문이다. 일반적으로 굴삭기는 동작 자유도가 매우 높기 때문에 만약 어느 한 부분의 동력 비율이 달라지게 될 경우, 기존 방식에 익숙해진 운전자들은 운전이 어려움을 겪는다. 뿐만 아니라, 동력 분배가 달라진 상황에서의 출력 증대는 오히려 시스템의 효율을 악화시키는 문제가 있다.

따라서, 운전자의 편의성과 연비 개선을 위해

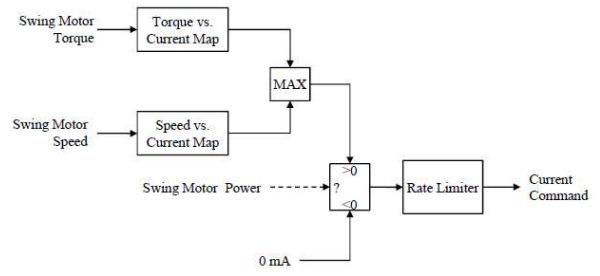


Fig. 6 Block diagram of the pump displacement controller

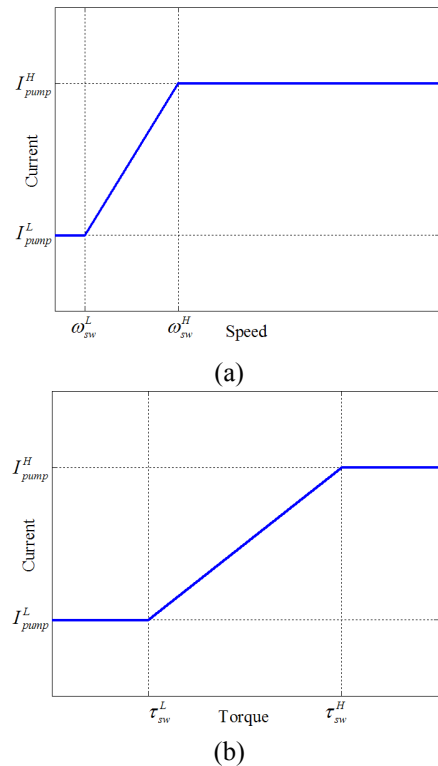


Fig. 7 Control maps for the pump displacement controller

최대한 엔진식 굴삭기와 비슷한 동력특성을 가지도록 Fig. 6 과 같이 선회의 동작상황을 고려하여 유압펌프의 출력을 제한하는 로직을 구현하였다. Fig. 7 과 같이 선회 전동기의 전류와 속도에 따라 펌프의 제어전류 지령값을 계산하며, 이 전류 지령에 따라 유압펌프의 출력감소율이 결정된다. 즉, 선회 출력이 클수록 유압펌프의 출력을 감소시킴으로써 엔진식 굴삭기와 비슷한 동작 특성을 갖도록 했으며, 이를 통해 운전 조작성과 연비개선을 동시에 달성하도록 하였다.

3.3 울트라 캐패시터 전압제어

울트라 캐패시터는 에너지 저장장치의 일종으로, 본 시스템에서는 선회 전동기 및 엔진보조 전동기에 동력공급을 하거나 발전된 에너지를 저장하는

역할을 한다.

특히 선회 전동기는 순간적으로 매우 높은 출력을 내며 구동 및 발전하기 때문에, 울트라 캐패시터의 전압이 매우 낮은 상태라면, 동등 출력을 내기 위해서 더 높은 전류가 필요하게 된다. 이때 울트라 캐패시터 내부 저항에 의해 손실되는 에너지는 전류의 제곱에 비례하기 때문에, 대전류가 흐를 때 전압을 최대한 높게 유지할 경우 손실을 줄이고 효율을 높일 수 있다.

반면에 전달효율을 높이기 위해 캐패시터의 전압을 너무 높게 유지할 경우, 선회 감속 시에 발생할 수 있는 에너지가 작아지게 되며, 이는 연비에 악영향을 미친다.

따라서, 위 두 가지 요구조건을 동시에 만족시킬 수 있는 알고리즘을 Fig. 8 와 같이 설계하였다. 울트라 캐패시터에서의 요구충전량과 선회 전동기의 출력을 이용하여 울트라 캐패시터의 목표전압을 계산하였으며 측정 전압과의 차이를 엔진보조 전동기가 충전해줌으로써, 선회회생량 및 캐패시터의 전압을 최대화하였다.

3.4 냉각 팬 속도 감속

일반적으로 굴삭기는 냉각유체의 온도 조절을 위해, 냉각 팬을 이용하여 라디에이터 룸에 외부 공기를 강제로 공급하는 방식을 채택하고 있다. 특히, 해당 엔진식 굴삭기의 경우 냉각 팬과 엔진축이 벨트로 연결되어 팬 동력을 공급하는 구조를 취하고 있다. 엔진으로부터 동력을 공급받은 냉각

팬이 차가운 외부공기를 라디에이터 룸 안으로 끌어들이고, 그 공기는 각종 라디에이터를 지나면서 열을 흡수함으로써 동력시스템의 유체를 냉각시킨다.

본 하이브리드 굴삭기의 냉각 시스템은 기본적으로 엔진식 굴삭기와 동일한 구조를 가지며, 여기에 각종 전력장치(울트라 캐패시터, 전동기, 전력변환장치)를 냉각시킬 수 있는 라디에이터를 추가하였다. 그러나 하이브리드 시스템을 적용함으로써, 엔진에서 생성되는 에너지가 크게 감소했기 때문에 요구 냉각량도 이에 비례하여 줄었다. 특히, 하이브리드 굴삭기에서는 선회가 유압회로에서 분리되었기 때문에 유압시스템의 방열량은 엔진식 굴삭기 대비 낮은 상태이다. 그 결과, 동등한 작업에 있어서 Fig. 10 과 같이 엔진 냉각수 및 유압작동유의 온도가 훨씬 낮게 유지되고 있다. 따라서, 냉각 유체의 온도가 일반굴삭기보다 높아지지 않는 한도 내에서 팬 속도를 줄여 소모동력을 저감시킬 경우, 그 만큼의 연비를 개선할 수 있다.

팬 속도 변화에 따른 냉각 유체의 온도 변화를 예측하기 위해 실험적 열전달 모델을 만들었으며, 이를 통해 Fig. 11 과 같이 팬 속도 저감의 한계점을 도출해냈다. 위 모델에 따라 기존 팬 속도를 변경할 경우, 엔진식 굴삭기와 동등 수준의 냉각 유체 온도를 유지하면서 팬 동력소모를 최소화할 수 있다.

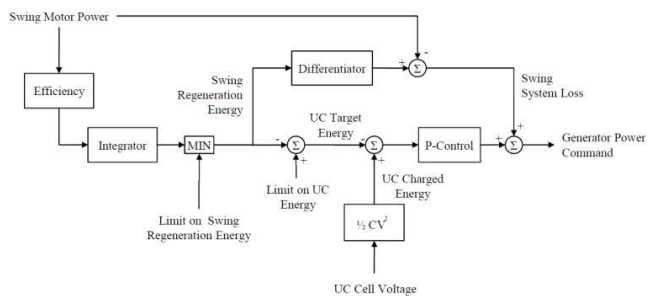


Fig. 8 Block diagram of the UC voltage controller

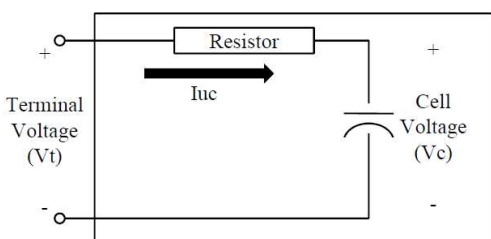


Fig. 9 Model for the ultra-capacitor

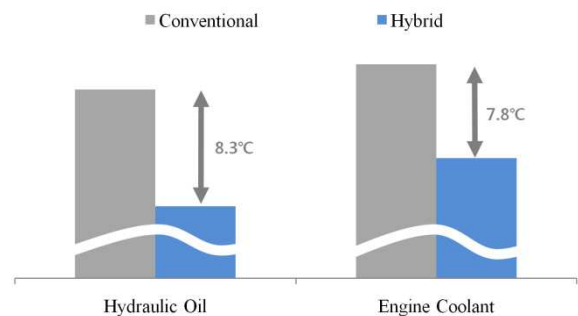


Fig. 10 Comparison of the temperature

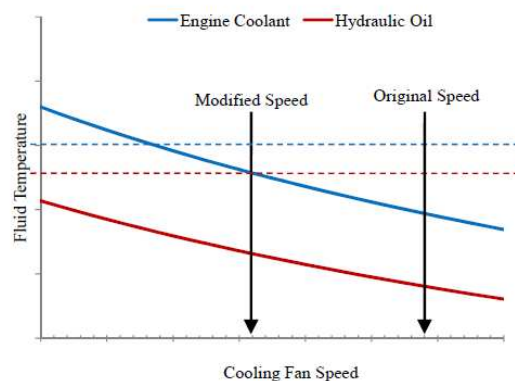


Fig. 11 Fan speed vs. coolant and oil temperature

4. 시험 결과

위 언비 및 운전조작성 개선 방법론을 기존 복합형 하이브리드 굴삭기에 적용하여, 표준 굴삭시험을 수행하였다.

Fig. 12 는 표준 굴삭 작업 중 엔진 가변속도 및 복합 동작 펌프 제어의 동작을 보여준다. t1~t2 는 흡을 버킷에 담는 굴삭동작으로 유압 부하가 가장 큰 구간 중 하나이다. t2~t3 는 버킷에 담긴 흡을 들어올리면서 회전하는 선회복합동작으로, 선회복

합동작 펌프 제어로직이 작동되는 구간이다. Fig. 12(b)를 통해 이 구간에서 펌프 제어 전류가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있으며, 그 결과 Fig. 12(a)의 펌프 출력 역시 비례하게 감소하여 운전조작성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

t4~t5 구간은 버킷에 담긴 흡을 버린 후 다시 원래 자리로 돌아오는 구간으로, 펌프의 부하와 전동기의 발전요구출력이 상대 엔진 가변속도 제어로직에 적으로 낮은 구간이다. 따라서, 해당 구간의 엔진회전속도가 낮아진 것을 Fig. 12(c)에서 확인할 수 있다.

Fig. 13 은 표준 굴삭작업 2 개의 사이클에서 울트라 커패시터의 전압 제어기의 동작 결과를 보여준다. Fig. 13(a)는 커패시터의 전압이 목표전압을 잘 추종하는 것을 보여주며, Fig. 13(b)는 그때의 선회 및 엔진보조 전동기의 출력을 보여준다. Fig. 13(a)에 따르면 목표 전압에 따라 커패시터의 전압이 최대한 높게 유지되다가, 선회가 동작하면 회생을 대비하여 조금 낮게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 동시에 이 목표 전압을 유지하기 위해 선회 동작이 시작되면, 엔진보조 전동기가 적정

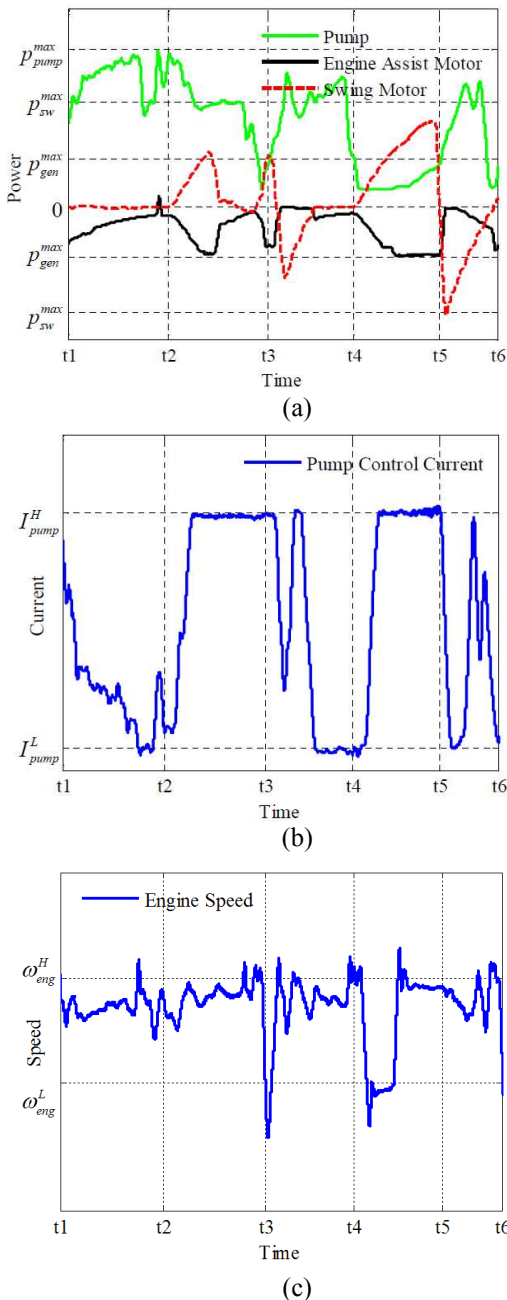


Fig. 12 Test result for a typical excavation cycle

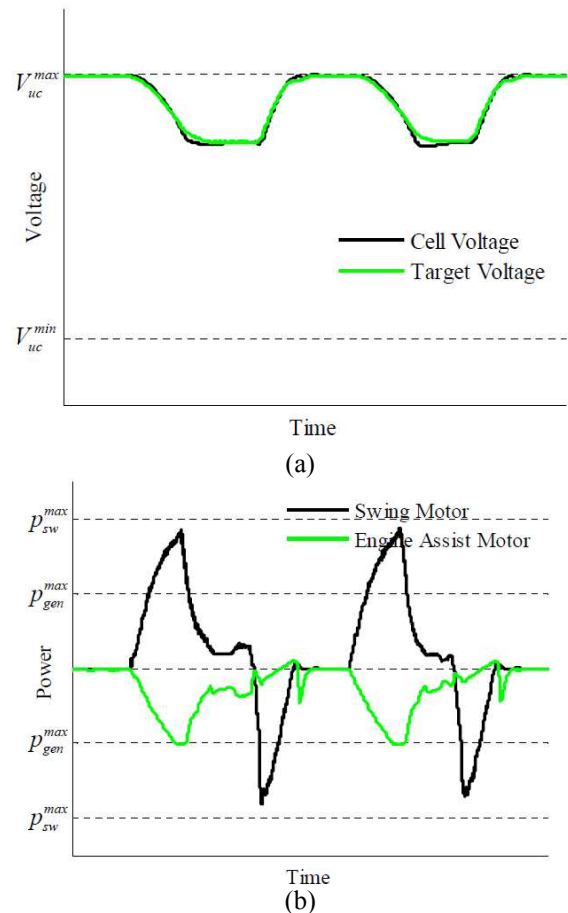


Fig. 13 Test result for the UC voltage controller

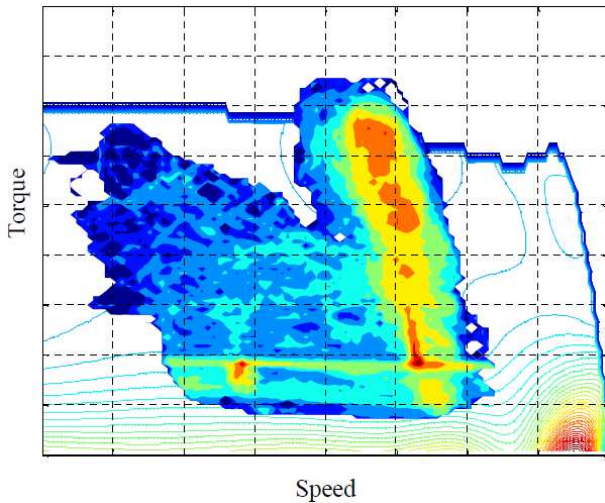


Fig. 14 Operating points of the engine



Fig. 15 Prototype hybrid excavator

량의 발전을 해주는 것을 Fig. 13(b)를 통해 확인할 수 있다.

Fig. 14 는 위 표준 굴삭시험에서의 엔진 작동점 빈도수 그래프이다. 고정된 엔진속도를 낮춰 연비 개선을 이뤄낸 Fig. 2 에서 더 발전하여, 엔진 가변 속도 제어로직을 추가한 결과, 작업기의 요구출력이 낮은 구간에서는 엔진 작동점을 저속-고부하 영역으로 움직임으로써, 엔진의 사용 영역이 더 넓어졌고, 더 고효율화된 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는, 엔진보조전동기, 선회전동기, 울트라 캐패시터가 탑재된 복합형 하이브리드 굴삭기를 개발하여 연비를 개선하였다. 일반적으로 알려진 연비개선 요소(선회동력 회생, 엔진속도 이동)외에 엔진 가변속도 제어, 선회복합동작 펌프 제어, 울트라 캐패시터 전압제어, 냉각 팬 출력 저감 등의 기능을 추가적으로 적용하여, 엔진식

대비 높은 연비와 동등 수준의 운전조작성을 달성하였다.

추가적으로, 붐 동작에 사용되는 유압에너지를 전기에너지로 회생하여 사용할 수 있는 기능이 추가될 예정이며 이를 통해 더 높은 연비개선이 가능할 것으로 예상된다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부의 산업융합원천기술 개발사업 “하이브리드 굴삭기 핵심기술 개발”의 연구 결과를 토대로 작성되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Kwon, T.-S., Lee, S.-W., Sul, S.-K., Kang, B.-I., Hong, M. Park, C.-G. and Kim, N.-I., 2008, “Power Control Algorithm for Hybrid Excavator with Super Capacitor,” Industry Applications Society Annual Meeting. IAS '08. IEEE, ISSN : 0197-2618, pp.1-8.
- (2) Yoo, S., An, S., Park, C. and Kim, N., 2010, “Design and Control of Hybrid Electric Power System for a Hydraulically Actuated Excavator,” SAE International Journal of Commercial Vehicles, DOI: 10.4271/2009-01-2927, 118(2010), pp.264-273.
- (3) Kim, H., Choi, J., Yoo, S. and Yi, K., 2010, “An Investigation into Optimal Energy Management Strategy for Compound Hybrid Excavator,” AVEC 2010.
- (4) Kim, H., Choi, J., Yoo, S. and Yi, K., 2010, “An Investigation into Fuel Efficiency improvement of Compound Hybrid Excavator Using Dynamic Programming Technique,” Electric Vehicle Symposium.
- (5) Lee, H.-J., Sul, S.-K., Kwak, S.-Y. and Kim, S.-I., 2010, “System Configuration and Power Control Strategy for Compound Type Hybrid Excavator with Ultra Capacitor,” Power Electronics Conference (IPEC), International, ISBN: 978-1-4244-5394-8, pp.820-826.
- (6) Jo, D.-Y. and Kwak, S., 2011, “Development of Fuel-efficient Construction Equipment,” Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011 IEEE 8th International Conference on ISSN : 2150-6078, pp. 31-37.
- (7) Choi, J., Kim, H., Yu, S. and Yi, K., 2011, Development of Integrated Controller for a Compound Hybrid Excavator, *Journal of Mechanical Science and Technology*, DOI: 10.1007/s12206-011-0333-z, 25(2011), pp.1557-1563.